

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	Hao Wu
氏名	呉 浩
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 甲 第43号
学位授与	平成25年 9月12日
学位授与条件	学位規定第3条第3項該当
論文題目	Characteristics of Strong Ground Motions and Fragility Curves of Buildings during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における強震動及び建物被害率の関係)
論文審査委員	(主査) 教授 正木 和明 <sup>1</sup> (審査委員) 客員教授 入倉孝次郎 <sup>2</sup> 教授 岡田久志 <sup>3</sup> 教授 鈴木森晶 <sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

### Characteristics of Strong Ground Motions and Fragility Curves of Buildings during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における強震動及び建物被害率の関係)

On March 11, 2011, an Mw9.0 mega-thrust interplate earthquake, named as “the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake” occurred. It was the largest earthquake in the history of Japan and the fifth largest one in the world since instrumental recordings began in 1900. This earthquake caused heavy damage to infrastructures, lifelines and buildings by shaking as well as catastrophic disasters by tsunami. According to the Fire and Disaster Management Agency, as of March 2012, 129,198 residential buildings were totally collapsed, 254,238 residential buildings were partially collapsed (or half-collapsed), and 715,192 residential buildings were partially damaged. It is urgent and essential to clarify the relationships between building damage ratios and characteristics of ground motions, i.e., fragility curves, which will benefit disaster mitigation planning and damage assessment in future disastrous earthquake.

- 1 愛知工業大学 工学部 都市環境学科 (豊田市)
- 2 愛知工業大学 客員教授 (豊田市)
- 3 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

Chapter 1 provides a brief introduction about the damage caused by the mainshock and reviews the stud-

ies about fragility curves in the previous destructive earthquakes.

Chapter 2 discusses the relationships between building damage ratios in administrative districts and the characteristics of observed ground motions such as peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), JMA seismic intensity ( $I_{JMA}$ ) and spectral intensity (SI). Three different damage ratios, i.e., total-collapse ratio (TCR), collapse ratio (CR) and damage ratio (DR), are examined. The building damage data in these districts where most of the building damage might be caused by the tsunami in the coastal cities or liquefaction near Tokyo Bay are excluded in order to investigate the building damage ratios due to earthquake ground motions. This study found out that DR had the best correlation with ground motion indices among three damage ratios.  $I_{JMA}$ , PGV and SI had a better correlation with TCR, CR and DR than PGA did.

Chapter 3 describes a method to estimate the ground motions during the mainshock by considering underground velocity structures at observed sites and damaged sites, modified empirical Green’s function at bedrock and the short-period source model of the mainshock. First, the underground velocity structures are identified from microtremor H/V spectral ratios at the target sites. We found that the underground velocity structures identified from microtremor H/V spectral ratio were not always the same as those from earthquake H/V spectral ratio. However, the transfer functions calculated with the identified underground velocity structures were almost

the same. This indicates that microtremor H/V spectral ratios can reasonably identify the velocity structures at those sites where no strong motion stations were installed. Second, modified empirical Green's function at bedrock are calculated with observed ground motions on the surface from small events and the identified underground velocity structures at a strong motion station. The bedrock ground motions from the mainshock are synthesized using the modified empirical Green's functions at bedrock and the short-period source model. Third, surface ground motions at damaged sites from the mainshock are estimated using the synthesized mainshock motions at bedrock and the transfer functions at damaged sites. We confirmed that the estimated ground motions coincided with the observed ones at other strong motion stations. The consistency between estimated ground motions and observed ground motions suggested that the method proposed in this study is effective for estimating ground motions at damaged sites. On the other hand, we found that the estimated mainshock motions at some soft-soil sites were not always consistent with the observed ones using the linear method, because surface ground motions were influenced by nonlinear behavior of soft soil grounds.

Chapter 4 applies the proposed method in chapter 3 to estimate ground motions at the damaged sites in subdistricts of Osaki and Kurihara cities as well as Wakuya town, Miyagi Prefecture. Ground motions on the surface at the damaged sites are estimated from the ground motions using the bedrock motions from the mainshock and the transfer functions from the identified underground velocity structures. Then, the fragility curves in subdistricts are constructed with the estimated ground motions and the damage ratios.

Chapter 5 concludes this thesis with some future works. In summary, the estimated ground motions at damaged sites correlate with the damage ratios in the subdistricts of Osaki and Kurihara cities as well as Wakuya town near source areas. It implies that the method in this study is effective in estimating ground motions at damaged sites during the mainshock.

#### 論文審査結果の要旨

本論文は、2011年東北地方太平洋沖地震における強震動と建物被害率の関係を明らかにし、建物の被害関数の構築を行ったものである。1995年兵庫県南部地震の後、強震動

と建物被害の関係の検討がなされたが、強震動観測データが少なかったため、精度について多くの課題が残された。兵庫県南部地震以降、強震観測網が整備され、多くの強震記録が蓄積されるようになった。しかしながら、最近発生した、中越地震、能登半島地震、中越沖地震、岩手宮城内陸地震はいずれも兵庫県南部地震と同じ内陸地殻内地震であり、被害は狭い地域に限定され、被害地域における強震記録数および建物被害資料は多くなかったため、強震動と建物被害の関係について定量的な研究はほとんどなされていない。東北地方太平洋沖地震はM9クラスの海溝型巨大地震であり、全国の広い地域で被害が発生したために、建物被害に関するデータ及び強震記録はこれまでに多く得られた。これらの被害データと強震動記録を収集し、強震動特性と建物被害率の関係、すなわち被害関数を求めることは、工学上重要な研究課題といえる。

しかしながら、近年強震記録が多く得られるようになったとはいえ、地震観測点の分布密度はまだまだ低く、被害地域の強震動特性を一つの近傍観測点における記録で代表させるには問題があるとの指摘もある。したがって、近傍に強震記録がない被害地域の強震動を推定する必要がある、本論文はそのための手法の開発・提案を行うと共に、強震動と建物被害の関係式の構築を試みたものである。

強震動を評価するためには、その場所の地盤の地震波速度構造を推定する必要がある。本論文では、対象地点での常時微動観測データを用いて速度構造を推定し、その地点における地震動を推定する手法を提案している。常時微動（地盤は常時微小な振動で揺れている）は地震動と異なり、いつでも、どこでも測定できるので手法として有効であると期待されている。本論文は、常時微動を活用した地盤の速度構造の推定手法が有効であることを検証し、次に被害地域での常時微動観測から推定された地盤構造による地震動の増幅特性と強震動観測記録から推定された東北地方太平洋沖地震の短周期震源モデルを用いて、被害地域の強震動を評価し、その結果に基づき地震動と建物被害との関係を明らかにしたものである。

第1章では、本研究の背景、本研究に関連する既往の研究のレビューと本研究の目的について述べている。

第2章では、東北地方および関東地方の市・町を単位として、観測された強震動の特性と建物被害率との関係を明らかにしている。まず、消防庁が公表している東北地方太平洋沖地震における全国市・町の建物被害一覧から、津波被害を受けた市・町を除く94市・町の建物被害（全壊、半壊、一部損傷）データを収集し、建物総数で除した3種類の建物被害率（全壊率、半壊以上の被害率、一部損傷以上の被害率）を求めている。一方、防災科学研究所が公表しているK-NET、KiK-netの強震観測記録の中から、94市・町内の観測点および近傍の観測点の97個の記録を収集し、4つの地震動指標（地表最大加速度、地表最大速度、

気象庁震度、SI値)を計算している。これらの地震動指標と被害率との相関を解析し、建物被害率は地震動指標と関係することを明らかにしている。しかし、市・町のような広域(さしわたして数10km)の地震動指標を一つの観測点の記録で代表させることは困難であり、より小さい適切な大きさの領域を想定して地震動と建物被害の関係を議論する必要がある。

第3章では、常時微動を用いて地震観測点がない被災地域の地震動を推定する手法を提案している。第2章で指摘した単位領域での地震動の代表性の問題を解決するためには、被災地を市・町単位からより小さい地域に分割し、そこでの被害率を求めるとともに、その領域を代表する強震動指標を推定する事が必要とされる。しかしながら、そのことは一方で、分割された狭い地域においては地震観測点がなく地震動指標が存在しない場合が多い。第3章では、この問題を解決する方法として常時微動を用いて地盤の速度構造を推定し、地震動の増幅特性を推定する方法を提案している。まず、地震動および常時微動の水平動スペクトルと上下動スペクトルの比(H/Vスペクトル)を用いて地震および常時微動それぞれから推定された地震波速度構造を同定し、二つの速度構造を用いて算出した地震波伝達関数は一致することを検証している。次に、常時微動観測から推定された速度構造を用いて評価される地震動が観測された地震動と一致することを小地震についてまず検証し、本手法の有効性を明らかにしている。東北地方太平洋沖地震については、はじめに、強震観測点の小地震記録から地震基盤の小地震の入力地震動を評価し、つぎに、短周期震源モデルを用いて経験的グリーン関数法により地震基盤における本震の入力地震動を推定し、さらに、常時微動観測から得られた速度構造を用いて推定された地表地震動が観測地震動と一致することを検証し、地震観測点がない被害地における東北地方太平洋沖地震の地震動が推定できることを明らかにしている。

第4章では、提案した手法を用いて宮城県大崎市、栗原市の被害地における東北地方太平洋沖地震の地震動を推定し、地震動指標と被害率との関係(被害関数)を求めている。すなわち、両市を合併前の旧町域(さしわたして数km)に分割し、それぞれの旧町域における地震動を提案する手法で推定し、被害率も旧町域ごとに求めている。得られた被害関数は第2章で求めた市・町単位の被害関数より地震動指標との相関が高いことを示している。

第5章はまとめであり、提案する手法で求められた被害関数の精度が向上したことを示し、本手法の有効性について述べている。

地震動と建物被害率との関係を示す被害関数は地震被害を予測する時に必要不可欠な関数である。南海トラフ地震等の将来発生が危惧される巨大地震に対する被害を予測する場合には従来兵庫県南部地震における西宮市や神戸市灘区の被害関数が引用されているケースが多い。しかし、この地震は大都市直下に起こった内陸地殻内地震であ

り、大都市における事例を全国的に引用するには検証が必要であり、また地殻内地震と海溝型地震の違いについても比較検討が必要とされている。本研究は海溝型巨大地震について、また全国のデータを用いて被害関数を求めた点に特徴があり、今後の被害予測手法に有用であると期待される。

以上の観点から、本研究論文は、学術上、特に地震工学上有用であり、社会的貢献度も高いと認められる。よって、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認められる。

(受理 平成25年10月15日)